

平成 30 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：屋外環境

研究期間：平成 30 年度

課題番号：182009

研究課題名（和文）：乱流拡散効果を加味した瞬間風速値に基づいた市街地内の風通しと市街地形状パラメータの関係性解明

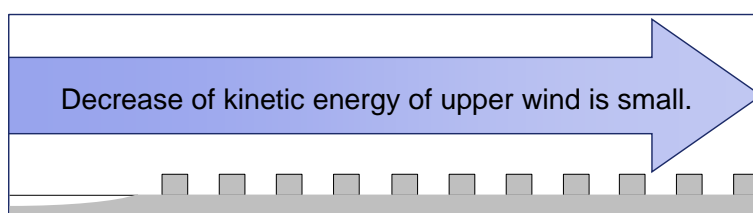
研究課題名（英文）：Study on the relationship between geometric parameters of buildings and urban ventilation based on the instantaneous wind velocity within the built-up area

研究代表者：石田 泰之

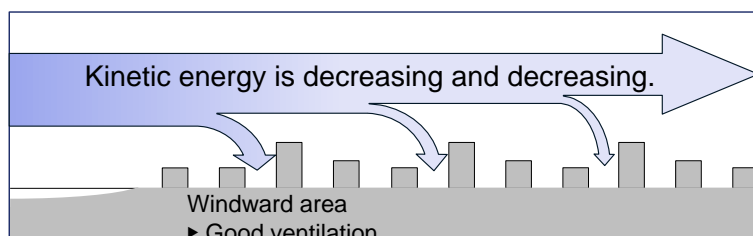
交付決定額（当該年度）：260,000 円

1. 研究の目的

- 1) 我々は、市街地の地表付近の平均風速がグロス建蔽率と強い負の相関があること、また、中高層市街地と低層市街地ではグロス建蔽率が同じであっても平均風速は中高層市街地の方が勝っていることを明らかにした^{文1),2)}。都市空間の風通しを考える場合、市街地上空からの鉛直方向の運動量輸送の効果も重要であり、これには移流だけではなく乱流拡散の効果も大きい^{文3)}。低層市街地に比べて中高層市街地では建物高さにばらつきがあり、建物高さのばらつきによって活発となった鉛直方向の移流・乱流拡散の効果により、地表付近への運動量輸送が強まった結果、平均的な風通しが向上したものと考えられる。
- 2) 一方、我々は、市街地の建物高さにばらつきをつけることで、風の持つ運動エネルギーの散逸量が増加することを明らかにした。
- 3) 従って、建物高さにばらつきをつけることによって「地表付近の平均風速が向上する」という考えに則り、あらゆる市街地において建物高さにばらつきを設けた場合、例えば、風が海側から流入してくる状況と考えた場合には、風上側(海寄り)の市街地では風速向上が望めるであろうが、風下側(内陸奥深く)の市街地においては、風の持つ運動エネルギーが多く散逸してしまうことによって、風環境が悪化することもあり得る(図 1)。



(1)上空風の運動エネルギーを積極的に利用しない場合



(2)上空風の運動エネルギーを積極的に利用する場合

図 1 上空風の持つ運動エネルギーの利用

- 4) そこで本研究では、まず①実街区を対象に、建物高さのばらつきによる地表付近の風速の変化を確認する。また、②水平方向境界に周期境界条件を課した解析によって、建物高さがばらついた市街地が水平方向に無限に広がった場合の地表付近の通風性能を評価し、③地表付近の通風性能に及ぼす影響(悪影響)を適切に評価するための指標の検討を実施する。
- 文 1) 久保田,三浦,富永,持田, 日本建築学会計画系論文集,第 529 号, pp.109-116, 2000.3
 文 2) 久保田,三浦,富永,持田, 日本建築学会計画系論文集, 第 556 号, pp.107-114, 2002.6
 文 3) Ishida, Endo, Mochida, CD Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7), 2009

2. 研究の方法

- 1) LES(Large-Eddy Simulation)による CFD(Computational Fluid Dynamics)解析を実施する。
- 2) 実街区解析を実施する上で、衛星データを用いた実街区形状の再現方法を検討する。
- 3) 実街区解析の流入変動風データ作成のため、ドップラーライダー計測を実施する。
- 4) 実街区を対象とする解析を実施し、建物高さにばらつきのある市街地と比較的ばらつきの小さい市街地の比較から、実街区における建物高さのばらつきが、地表付近の風環境へ及ぼす影響を把握する。
- 5) 建物を模した直方体群が整列する街区モデルを対象に、LES を実施する。その際、水平方向境界に周期境界条件を課し、境界層が完全発達状態にある状況下の、平衡流れ場の分析を実施する。
- 6) 市街地内部の通風性能を評価するための評価指標の検討を行う。
- 7) 平衡流れ場における市街地形態(建物高さのばらつきを含む)と通風性能の関係を分析する。
- 8) 市街地が流れ場に及ぼす悪影響を評価するための指標として、既報に従い、運動エネルギーの散逸量を用いる。市街地形態の変更が運動エネルギー散逸量の多寡に及ぼす影響を分析する。
- 9) 8)で評価する運動エネルギー散逸総量と、7)で評価する市街地内部の通風性能の関係を分析し、運動エネルギー散逸総量の多寡により、市街地内部の通風性能が評価しうるか検討する。

3. 研究成果

1) 実街区を対象とする市街地形態が地表付近の平均風速に及ぼす影響の分析

我々は、昨年度の貴機関の助成によって、直方体群のアスペクト比、グロス建蔽率 λ_p 及び粗度立面積密度 λ_f を系統的に変化させた 14 ケースの直方体群を対象に LES を行い、市街地形態を表す上記パラメータと地表付近の平均風速 V_{mv} 、 V_{es} ((1),(2)式)⁴⁾との関係を分析し、地表付近の V_{es} の水平方向空間平均値(V_{es} の over line)と λ_f に高い相関が現れることを明らかにした(図 2)⁵⁾。しかし、この相関が、建物高さや平面形態が一樣ではない実街区に適用可能かは未だ確かめられていない。そこで我々は、実街区の形状を再現したモデルを対象に LES を実施し、直方体群における λ_f と V_{es} の水平方向空間平均値の関係の、実街区への適用性を評価する。

$$V_{mv}(\text{mean-vector speed}) : V_{mv} = \sqrt{\langle \bar{u}_i \rangle^2} = \sqrt{2K} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

$$V_{es}(\text{effective speed}) : V_{es} = \sqrt{\langle (\bar{u}_i + \bar{u}_i') \rangle^2} = \sqrt{2K + 2k} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

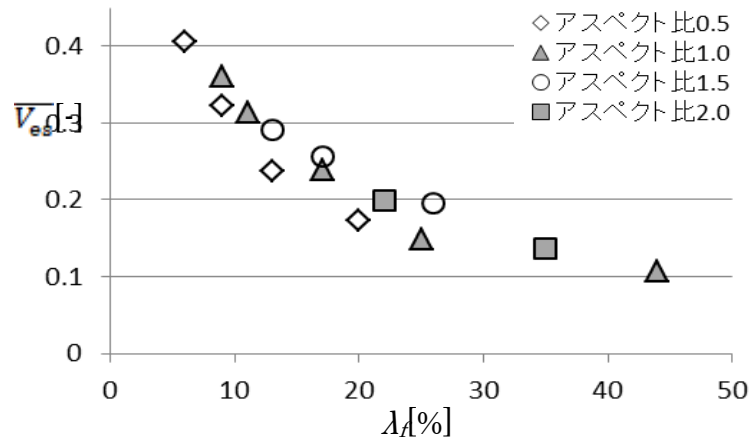


図2 λ_r と z_0 の関係

仙台市を対象に LCZ(Local Climate Zone)区分の異なる街区を複数選定した。LCZは、Stewart、Oke^{文7)}により提案された、地表面の被覆や市街地に存在する構造物群の規模等に応じて市街地を区分する手法(文5)。従来の低層・高層、低密・高密といった区分けから定量的な細分化が可能である。複数の区分の組み合わせによる分類もでき、大部分を占める区分を大字で、一部分を占める区分を小字で LCZO_□と表す。実街区モデルは、QGISversion2.18を用いてモデルを生成した。建物高さは、地物を含めた表層の高さを示した数値表層モデル DSM と、土地の標高の高さを示した数値標高モデル DEM との差分から推定した。DSM には ALOS World 3D(5m 解像度)を、DEM には国土地理院が提供する基盤地図情報の数値標高モデル(10m 解像度)を用いた(図3)。

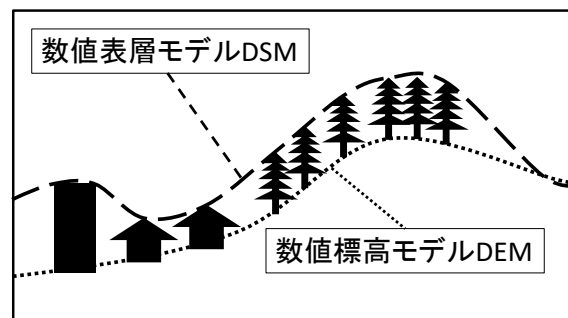


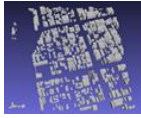
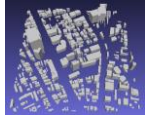

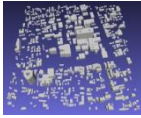
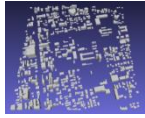
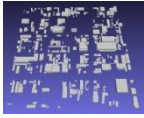
図3 DSMとDEM

解析ケースを表1に、再現モデルの例を表2に示す。また、解析領域を図4に示す。LESにはOpenFOAM ver4.1を用いた。SGSモデルは標準Smagorinskyモデル($C_s=0.12$)とした。風向は各ケースとも東とした。粗度区分Ⅲをターゲットとする流入変動風を、Xie and Castroの方法を基に、日本建築学会荷重指針・同解説で規定する平均風速、主流方向の乱れ強さ、積分長さスケールを課す検討をした大風・持田の手法に基づき生成した。流入面における境界層高さ(=500m)の平均風速は5m/sとした。その他の解析条件を表3に示す。10分間の助走計算の後10分間の計算結果を用い、結果の分析を行った。なお、境界層高さにおける平均風速を用いて諸量の無次元化を行った。

表 1 解析ケース(ケース名 : Case(LCZ 区分)-(n 個目))

ケース名	平均建物高さ h_{ave} [m]	グロス建蔽率 λ_p [%]	粗度立面積密度 λ_f [%]
Case2-1	17.41	33.14	37.85
Case2-2	21.05	33.61	42.16
Case2 ₄ -1	47.24	47.73	81.09
Case3-1	5.15	22.48	9.47
Case3-2	5.86	28.69	12.3
Case3-3	4.47	32.14	10.6
Case4 ₂ -1	33.48	36.03	40.8
Case5 ₆ -1	9.39	17.80	8.17
Case5 ₆ -2	13.39	27.41	16.22
Case5 ₆ -3	9.10	24.40	10.26
Case5 ₆ -4	11.1	25.52	17.50
Case8-1	8.57	31.78	13.51
Case8-2	8.06	31.36	11.93
Case8-3	7.81	31.79	10.95

表 2 再現モデルの一例

Case	Case2-1	Case2 ₄ -1	Case3-1
区分	中層・高密	中層・高密 + 高層・低密	低層・高密
鳥瞰図			
Case	Case4 ₂ -1	Case5 ₆ -1	Case8-1
区分	高層・低密 + 中層・高密	中層・低密 + 低層・低密	中規模・低層・低密
鳥瞰図			

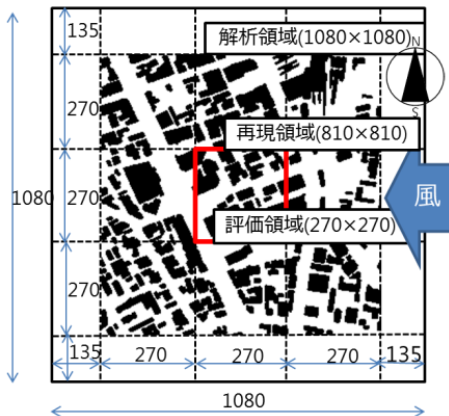


図 4 解析領域 (単位は[m])

表 3 解析条件

グリッドシステム	コロケーショングリッド
格子分割	108(x)×108(y)×100(z)
時間差分スキーム	完全陰解法
空間差分スキーム	2次精度中心差分
圧力解法	PISO法
流出境界条件	ゼロ勾配型境界条件
側面、上面境界条件	Slip壁
地表面、壁面境界条件	Spalding則

図 5 に λ_f と V_{es} の水平方向空間平均値の関係を示す。なお、直方体群の結果^{文5)}も併せて示す。

ここから、LCZ3(低層・高密)の街区では直方体群の結果に概ね沿うが、LCZ2(中層・高密)、LCZ24(中層・高密+高層・低密)及び LCZ42(高層・低密+中層・高密)の中・高層街区という建物高さのばらつきが大きい市街地では直方体群の結果より大きくなることが分かった。ここから、既往研究と同様の結果が実街区解析においても得られた。

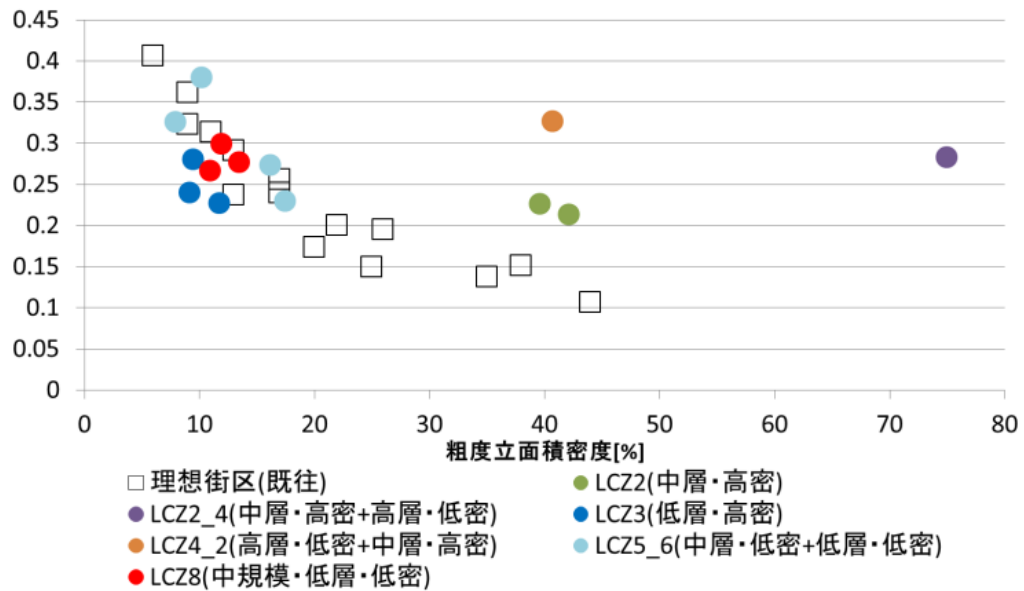


図 5 粗度立面積密度 λ_f と $\overline{V_{es}}$ の関係

文 4) Kikumoto, Ooka, Han, Nakajima, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 173, pp.91-99, 2018

文 5) Ishida, Takada, Okaze, Mochida, 7thCWE, 2018.

文 6) 大風, 持田, 風工学シンポジウム, 第 25 回, 2018

文 7) Stewart, Oke, Local Climate Zones For Urban Temperature Studies, 2012

2) 市街地による運動エネルギー散逸総量と屋外空間の通風性能の関係の評価

形態の異なる 4 種類のモデル市街地を対象に水平方向境界に周期境界条件を課した LES を実施することで、それぞれ形態の異なる市街地が無限に広がった条件下で、風の持つ全運動エネルギーの散逸総量及び各市街地内部の通風性能を評価するとともに、エネルギー散逸量と通風性能の関係を分析した。

表 4 に示すグロス建蔽率 25%、平均建物高さ H の 4 種類の市街地モデルを対象に LES を実施した。Case_RN および Case_SN は 5 種類の異なる高さを有する建物群からなり、その高さ及び数は 0.28H 高さが 1 棟、0.64H 高さが 3 棟、1.0H 高さが 7 棟、1.36H 高さが 4 棟、1.72H 高さが 1 棟である。その他解析条件は表 5 の通り。

表 4 解析ケース

Case	Case-RU	Case-SU
Layout		
Layout	Regular	Staggered
Building height	Uniform (=10.0(H))	Uniform (=10.0(H))
Case	Case-RN	Case-SN
Layout		
Layout	Regular	Staggered
Building height	Non-uniform	Non-uniform

表 5 LES の解析条件

Sub-grid scale model	The coherent structure Smagorinsky model ⁸⁾
Boundary conditions of building surfaces and ground	Werner and Wengle's approach ⁹⁾ was adopted, in which a linear or 1/7 power law distribution of the instantaneous velocity was assumed.
Time advancement	The second-order Adams–Bashorth for convention term, Crank–Nicoloson for diffusion term
Spatial derivative	Second-order central difference
Algorithm	SMAC method

文 8) Kobayashi:Physics of Fluids, 17(4), 045104, 2005

文 9) Werner,Wengle:Proc.8th Symp. on Turbulent shear Flows, 19-4, pp.155-158, 1991

① 屋外空間の通風性能の評価指標

開口部前後に圧力差を有する場合の換気流量 Q [m³/s] は(3)式で表される。

$$Q = C_D A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3) \quad C_D = \frac{Q}{A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}} \quad (4)$$

Q : 換気流量 [m³/s]
 A : 開口部の立面積 [m²]
 ΔP : 開口部前後の圧力差 [Pa]
 ρ : 空気密度 [kg/m³]

(4)式より、流量係数 C_D は実換気流量 Q と圧力差 ΔP で決まる流量の理論値との比で表現され、開口部における気流の通りやすさの程度を表す。本研究ではこれを応用し、normalized airflow rate, α を(5)式によって定義する。

$$\alpha = \frac{Q_u}{A_u \sqrt{\frac{2DF}{\rho}}} \quad (5)$$

Q_u : 市街地評価領域の気流流量 [m³/s]
 A_u : 市街地評価領域の立面積 [m²]
 DF : 流れの駆動力 [Pa](各ケースで一定)

α は、ある駆動力が働いたときの市街地内の風の通り易さ(通風性能)を表す指標であり、本研究では α により屋外空間の通風性能を評価する。評価範囲を図 6 に示す。

なお、水平方向境界に周期境界条件を課すことで水平方向に無限に市街地が広がった状況を再現することができる。流れ場が周期的定常に達した条件下で求まる normalized airflow rate, α の値は、あらゆる場所の市街地が表 4 に示す各ケースの市街地形態をとった場合の、無限遠点(無限に風下側に位置する市街地)における通風性能を示すと考えることができる。

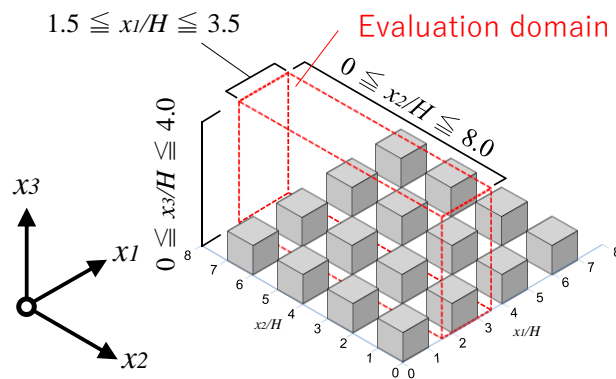


図 6 評価範囲

② 評価領域内のエネルギー散逸総量 ε_{Σ} の比較

(6)式は図 6 に示す評価範囲内の全運動エネルギーのエネルギー散逸総量 ε_{Σ} の定義式である。エネルギー散逸率 ε は、GS(Grid Scale)成分と SGS(Sub-grid Scale)成分の和から算出され、SGS 成分は局所平衡の仮定から、SGS の運動エネルギーの生産量と等しいとして(7)右式辺第二項により求めた。 ε_{Σ} は、平均建物高さ H 及び $4H$ 高さにおける主流方向の時空間平均風速を用いて無次元化された。

$$\varepsilon_{\Sigma} = \int_0^{4.0H} \int_0^{Lx2} \int_{1.5H}^{3.5H} \varepsilon dx_1 dx_2 dx_3 \quad (6)$$

$$\varepsilon = -\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

表 6 に各ケースの ε_{Σ} を示す。

ここから、建物配置を千鳥配置とした Case_SU(千鳥・一様)及び建物高さを非一様とした Case_RN(整列・非一様)では、最もエネルギー散逸量の少ない Case_RU(整列・一様)に対し約 3 割多く運動エネルギーが散逸することが分かる。また、その両方の形態を兼ね備えた Case_SN(千鳥・非一様)の値が最も大きく、市街地の影響を受け風の持つ運動エネルギーが最も多く失われる。

表 6 エネルギー散逸総量 ε_{Σ} の比較

Case	Case_RU	Case_RN	Case_SU	Case_SN
$\varepsilon_{\Sigma}[-]$	0.11	0.15	0.14	0.20
Case_RU に対する比率	1.0	1.36	1.27	1.82

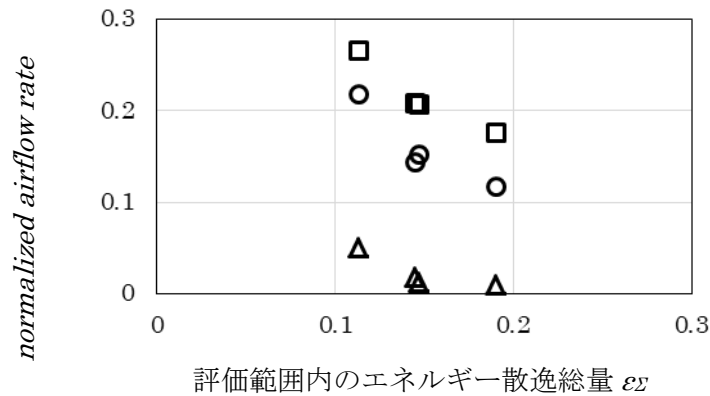
③ normalized airflow rate, α とエネルギー散逸総量 ε_{Σ} の関係

図 7 に normalized airflow rate, α とエネルギー散逸総量 ε_{Σ} の関係を示す。なお、各ケースで同じ駆動力が働いた場合の通風性能を把握するため、各ケースの駆動力総量値が等しい条件下で α を算出した。

図 2 より、normalized airflow rate, α とエネルギー散逸総量 ε_{Σ} には明確な負の相関があることが分かる。また、この関係は評価高さを $4.0H$ から $2.0H$ 、 $0.5H$ へと変更しても変化しない。

評価高さが $0.5H$ までの結果(図中、三角のマーカー)でも同様の傾向を示したことから、市街地全体で散逸する風の持つ運動エネルギー量が大きいほど、歩行者空間に近い領域の α は減少する。つまり、通風性能が悪化したといえる。

以上から、既往研究^{文1)}等において、建物群の高さが一様である場合よりも非一様である場合の方が地表付近の通風性能が高いことが報告されているが、あらゆる場所で建物高さを非一様化させた場合、その風下側に位置する市街地では建物高さが非一様であっても、地表付近の通風性能は改善せず、むしろ悪化する可能性が示された。



- : 図 1 に示す評価範囲の normalized airflow rate, α
- : 評価領域の鉛直方向範囲を 2.0H までとしたときの α
- △ : 評価領域の鉛直方向範囲を 0.5H までとしたときの α

図 2 normalized airflow rate, α とエネルギー散逸総量 ϵ_Σ の関係

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Ishida, Okaze, Mochida, “Influence of urban configuration on the structure of kinetic energy transport and the energy dissipation rate”, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 183, pp.198-213, 2018.

[学会発表] (計 6 件)

1. Ishida, Takada, Okaze, Mochida, “LES on the relationship between geometric parameters of buildings and pedestrian-level wind velocity in the built-up areas”, The 7th International Symposium on Computational Wind Engineering 2018, 2018.
2. 小野田, 石田, 渡辺, 上田, 持田, “仙台市における温湿度の多点同時測定とドップラーライダーによる上空気流性状の計測 (その 3) 2 台のドップラーライダーによる風向・風速の鉛直分布の詳細計測”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.(投稿済み)
3. 持田, 石川, 高田, 石田, 大風, “市街地形態が着目する及びその風下側領域環境に及ぼす影響(その 1) 着目する市街地における粗度立面積密度と歩行者高さにおける平均風速の空間平均値の関係”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済み)
4. 石川, 高田, 石田, 持田, 大風, “市街地形態が着目する及びその風下側領域環境に及ぼす影響(その 2) 着目する市街地の歩行者空間における総運動エネルギーに占める各成分の寄与率の分析”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済み)
5. 高田, 石田, 持田, 大風, “市街地形態が着目する及びその風下側領域環境に及ぼす影響(その 3) 理想街区を対象とした着目する市街地の Breathability 評価”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済み)
6. 石田, 大風, 持田, “市街地形態が着目する及びその風下側領域環境に及ぼす影響(その 4) 平衡状態における運動エネルギー散逸率と通風性能の分析”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済み)

5. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 泰之(東北大学・大学院工学研究科・助手)

(2) 研究分担者

1. 玄 英麗(東京工芸大学)
2. 持田 灯(東北大学)
3. 本間実季(東北大学)
4. 大場優作(東北大学)
5. 高田一成(東北大学)

6. 要約(Abstract)

研究課題名：乱流拡散効果を加味した瞬間風速値に基づいた市街地内の風通しと市街地形状パラメータの関係性解明

研究代表者名(所属)：石田 泰之 (東北大学)

1. 目的

- 1) 複数の実街区を対象に LES を実施し、直方体群の理想街区モデルを対象に実施された LES において確認された、粗度立面積密度 λ_f と地表付近における平均風速 V_{es} の水平方向空間平均値の関係の、実街区への適用性を評価する。

$$V_{es} = \sqrt{\langle \bar{u}_i \rangle^2} = \sqrt{\langle (\bar{u}_i) + \bar{u}_i' \rangle^2} = \sqrt{2K + 2k} \quad (1)$$

- 2) 水平方向境界に周期境界条件を課すことで水平に無限に広がる市街地を再現し、ここに風を吹走させることで、無限遠点(無限遠方の風下側に位置する市街地)の風環境を評価する。

2. 成果

- 1) 実街区のうち、粗度立面積密度が比較的高く且つ建物高さのばらつきが大きい市街地では直方体群の結果より地表付近の平均風速は大きくなる (図 1)。
- 2) 上空から市街地内部へ輸送される全運動エネルギーを平均・乱流成分に分け、さらに、これらが移流・拡散のどちらの影響で、どの位置において輸送されるのかを評価した。
- 3) 無限遠点における通風性能を評価する評価指標を提案した ((2)式)。これにより、建物高さの非一様性により、無限遠方においては通風性能が悪化することを確認した (図 2)。

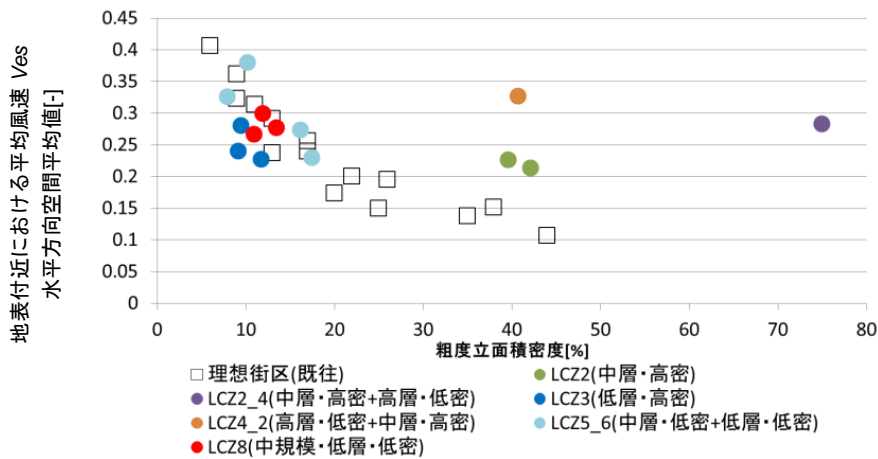
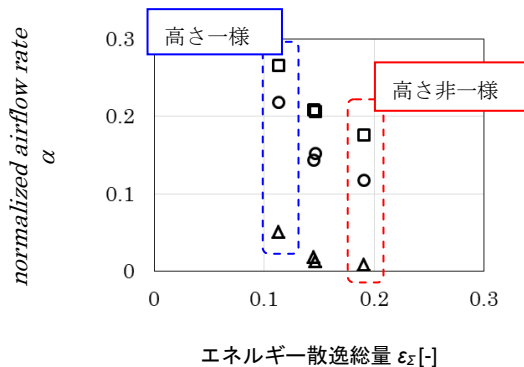


図 1 粗度立面積密度 λ_f と地表付近における平均風速 V_{es} の水平方向空間平均値の関係



$$\alpha = \frac{Q_u}{A_u \sqrt{2S \cdot \Delta x_3}} \quad (2)$$

$$\epsilon = -v \left\langle \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle - \left\langle \frac{\tau_{ij}}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle \quad (3)$$

□ : 評価領域の高さが $0 \leq x_3/H \leq 4.0H$ のときの α

○ : 評価領域の高さが $0 \leq x_3/H \leq 2.0H$ のときの α

△ : 評価領域の高さが $0 \leq x_3/H \leq 0.5H$ のときの α

図 2 normalized airflow rate, α とエネルギー散逸総量 ϵ_T の関係